

Methods of Robust Snapshot Positioning for Multi-Antenna Systems in Inland Water Applications

Dr. Christoph Lass

Institut für Kommunikation und Navigation
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR

05.07.2016

Knowledge for Tomorrow

A satellite image of the Earth, showing the Arctic region and surrounding landmasses. The image is a curved, semi-circular view of the planet, with the blue of the oceans and the green and white of the land and ice. The text 'Knowledge for Tomorrow' is overlaid on the image.

ENC 2016 in Helsinki (30.05. - 02.06.)



Twitter: #IndoorSummit



Inhaltsverzeichnis

- 1 DLR
- 2 Einführung in die Positionierung mittels Satelliten
- 3 Positionierung in Multi-Antennen-Systemen
- 4 Numerik & Ergebnisse
- 5 Themen für Masterarbeiten

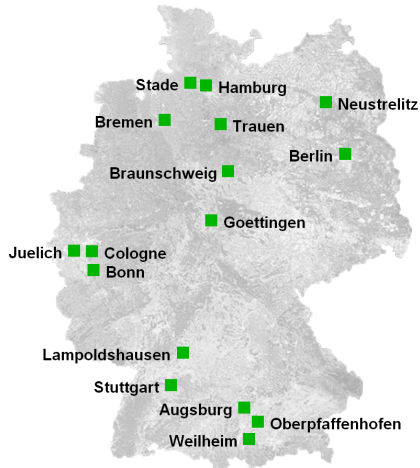


Inhaltsverzeichnis

- 1 DLR
- 2 Einführung in die Positionierung mittels Satelliten
- 3 Positionierung in Multi-Antennen-Systemen
- 4 Numerik & Ergebnisse
- 5 Themen für Masterarbeiten



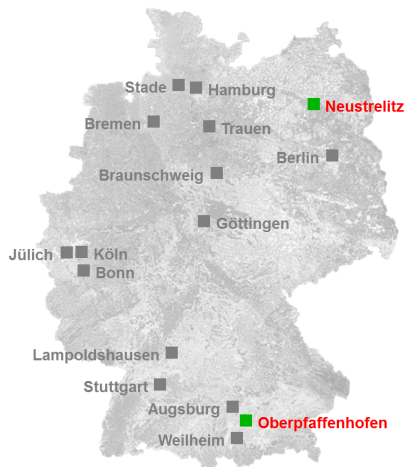
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt



- ca. 8.000 Mitarbeiter
- 33 Institute & Einrichtungen
- 16 Standorte
- Büros in Brüssel, Paris, Washington und Tokyo



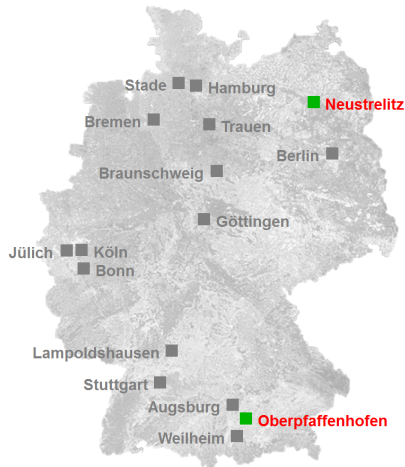
Institut für Kommunikation und Navigation



- 160 Mitarbeiter
- 33 Doktoranden
- 4 Abteilungen
- Eines von zwei Galileo-Kontrollzentren in Oberpfaffenhofen



Institut für Kommunikation und Navigation



Standort Neustrelitz



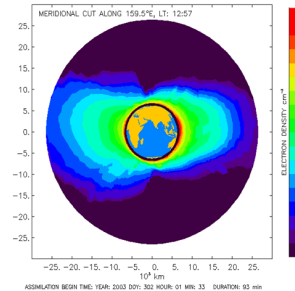
- Institut für Kommunikation und Navigation
- Institut für Methodik der Fernerkundung
- Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum
- DLR_School_Lab
- DLR Technologie-marketing



Neustrelitz - KN Forschungsgruppen



- Maritime Dienste
- Maritime Verkehrslageerfassung
- Multisensorsysteme



- Ionosphärische Effekte und Korrekturen



Einweihung Tri-Band-Station am 04.05.2016



Einweihung Tri-Band-Station am 04.05.2016



- Holger Maass
- Peter Georgino
- Erwin SELLERING
- Prof. Pascale Ehrenfreund
- Prof. Stefan Dech

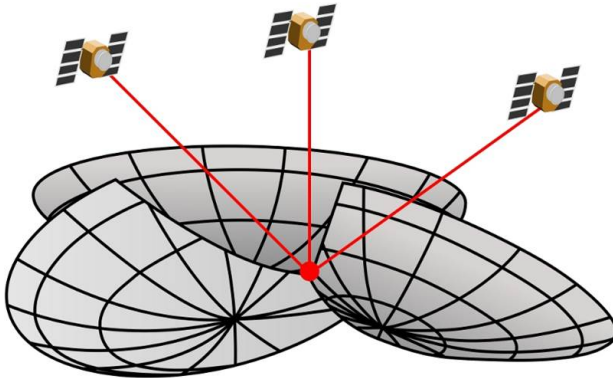


Inhaltsverzeichnis

- 1 DLR
- 2 Einführung in die Positionierung mittels Satelliten
- 3 Positionierung in Multi-Antennen-Systemen
- 4 Numerik & Ergebnisse
- 5 Themen für Masterarbeiten



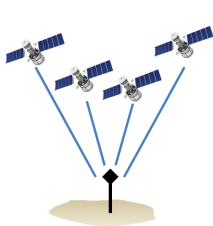
Grundprinzip



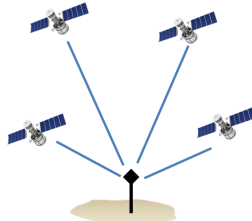
- Entfernung proportional zur Laufzeit des Signals
- Position ist Schnittpunkt der Kugelschalen



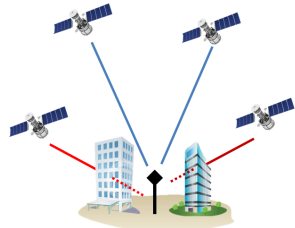
Satellitengeometrie



Poor geometry



Good geometry

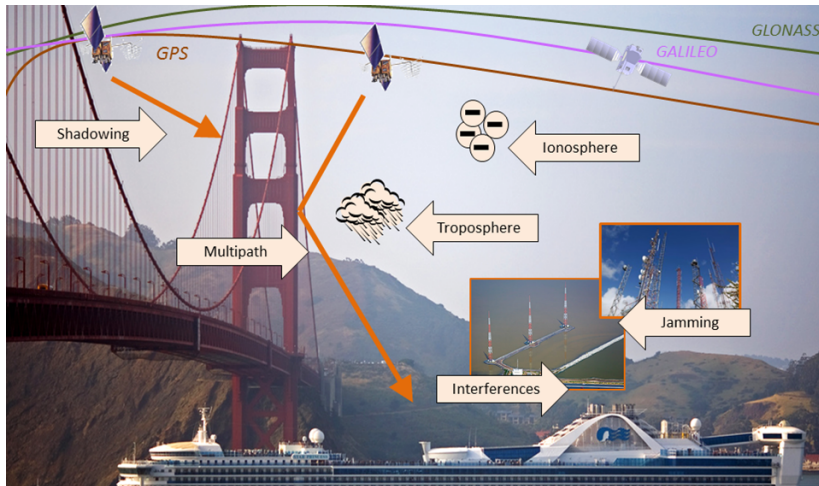


Good geometry, bad visibility

- Volumen des aufgespannten Körpers proportional zur erwarteten Genauigkeit



Äußere Fehlerquellen



Modellierung mit Uhrenfehlern

- „Lichtgeschwindigkeit · Laufzeit des Signals = Abstand Satellit j zu Empfänger“

$$\begin{aligned}c_0 \left(t^j + \delta t^j - \delta t \right) &= \|x_j - x\| + I^j + T^j + e^j \\ \Leftrightarrow \underbrace{c_0 \left(t^j + \delta t^j \right) - I^j - T^j}_{C^j} &= \|x_j - x\| + c_0 \delta t + e^j \\ \Rightarrow C^j &\approx \|x_j - x\| + c_0 \delta t\end{aligned}$$

- Fehlerterme
 - ▶ $\delta t^j, \delta t$: Satellitenuhrfehler, Empfängeruhrfehler
 - ▶ I^j, T^j : Einfluss der Ionosphäre und der Troposphäre
 - ▶ e^j : Multipfad, abweichende Umlaufbahn des Satelliten, Variation im Phasenzentrum der Antenne, ...



Modellierung mit Uhrenfehlern

- „Lichtgeschwindigkeit · Laufzeit des Signals = Abstand Satellit j zu Empfänger“

$$\begin{aligned}c_0 \left(t^j + \delta t^j - \delta t \right) &= \|x_j - x\| + I^j + T^j + e^j \\ \Leftrightarrow \underbrace{c_0 \left(t^j + \delta t^j \right) - I^j - T^j}_{C^j} &= \|x_j - x\| + c_0 \delta t + e^j \\ \Rightarrow C^j &\approx \|x_j - x\| + c_0 \delta t\end{aligned}$$

- Fehlerterme
 - ▶ $\delta t^j, \delta t$: Satellitenuhrfehler, Empfängeruhrfehler
 - ▶ I^j, T^j : Einfluss der Ionosphäre und der Troposphäre
 - ▶ e^j : Multipfad, abweichende Umlaufbahn des Satelliten, Variation im Phasenzentrum der Antenne, ...



Beobachtung für Antenne i und Satellit j

$$C_j^i = \|x_j - x^i\| + c_0 \delta t^i$$

- Unbekannt
 - ▶ $x^i \in \mathbb{R}^3$: Position von Antenne i (ECEF)
 - ▶ $\delta t^i \in \mathbb{R}$: Empfängeruhrfehler von Antenne i
- Gegeben
 - ▶ C_j^i : Korrigierte Pseudoentfernung zwischen Antenne i und Satellit j
 - ▶ x_j : Position von Satellit j
 - ▶ c_0 : Lichtgeschwindigkeit
- Mindestens 4 Beobachtungen benötigt



Inhaltsverzeichnis

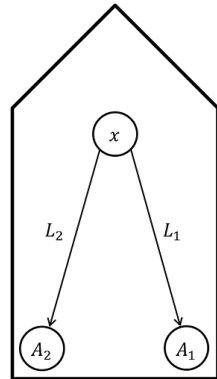
- 1 DLR
- 2 Einführung in die Positionierung mittels Satelliten
- 3 Positionierung in Multi-Antennen-Systemen**
- 4 Numerik & Ergebnisse
- 5 Themen für Masterarbeiten



Multi-Antennen-Systeme



MS Bingen



Modell

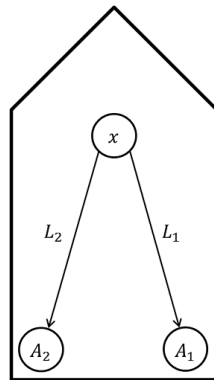
- A_1 und A_2 durch x und Orientierung des Schiffes eindeutig bestimmt



Modellierung

$$C_j^i = \left\| x_j - \underbrace{(x + R(q)L^i)}_{x^i} \right\| + c_0 \delta t^i$$

- Unbekannt
 - ▶ $x \in \mathbb{R}^3$: Position (ECEF)
 - ▶ $\delta t^i \in \mathbb{R}$: Empfängeruhrfehler von Antenne i
 - ▶ $q \in \mathbb{R}^4$: Quaternion mit $\|q\| = 1$
- Gegeben
 - ▶ C_j^i : Korrigierte Pseudoentfernung
 - ▶ x_j : Position von Satellit j
 - ▶ $R(q)$: Rotationsmatrix
 - ▶ L^i : Hebelarm zwischen x und Antenne i im Koordinatensystem des Schiffes
 - ▶ c_0 : Lichtgeschwindigkeit



Vergleich und Motivation

Ein-Antennen-Ansatz

- ≥ 4 Beobachtungen pro Antenne
- ≥ 12 Beobachtungen für 3 Antennen
- Indirekte Bestimmung der Orientierung

Multi-Antennen-Ansatz

- < 4 Beobachtungen pro Antenne möglich
- ≥ 9 Beobachtungen für 3 Antennen
- Direkte Bestimmung der Orientierung
- Redundanz von Beobachtungen \Rightarrow Erhöhte Robustheit



Einschub: Quaternionen¹

- Hyperkomplexe Zahl

$$(q_1, q_2, q_3, q_4) \in \mathbb{R}^4$$

$$q = q_1 + q_2\mathbf{i} + q_3\mathbf{j} + q_4\mathbf{k}$$

$$\mathbf{i}^2 = \mathbf{j}^2 = \mathbf{k}^2 = \mathbf{ijk} = -1$$

- Rotationsachse $u = (u_x, u_y, u_z)$ mit dem Winkel θ :

$$q = \cos \frac{\theta}{2} + (u_x\mathbf{i} + u_y\mathbf{j} + u_z\mathbf{k}) \sin \frac{\theta}{2}$$

¹W.R. Hamilton (1805-1865), On Quaternions; or on a new System of Imaginaries in Algebra (*letter to John T. Graves*), 17.10.1843



Einschub: Quaternionen

- Rotation von Vektor $v \in \mathbb{R}^3$ mit q , wobei $\|q\| = 1$

$$(v'_q, v') = q \otimes (0, v) \otimes q^*$$

$$v' = R(q)v$$

- Rotationsmatrix:

$$R(q) := \begin{pmatrix} 1 - 2(q_3^2 + q_4^2) & 2(q_2q_3 + q_1q_4) & 2(q_2q_4 - q_1q_3) \\ 2(q_2q_3 - q_1q_4) & 1 - 2(q_2^2 + q_4^2) & 2(q_3q_4 + q_1q_2) \\ 2(q_2q_4 + q_1q_3) & 2(q_3q_4 - q_1q_2) & 1 - 2(q_2^2 + q_3^2) \end{pmatrix}$$



Minimierungsproblem

- Residuen

$$r_k(x, \delta t, q) := \left\| x_j - \left(x + R(q)L^i \right) \right\| + c_0 \delta t^i - C_j^i$$

- Gewichtete kleinste Quadrate mit $\omega_k \neq 0$

$$\min_{\substack{(x, \delta t, q) \in \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^4 \\ \|q\|=1}} \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \omega_k^2 r_k^2(x, \delta t, q)$$



Ersetzen der Nebenbedingung

- Suchraum von Quaternionen kann durch Nebenbedingung auf \mathbb{R}^3 reduziert werden
- Exponential mapping² mit $\exp : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathcal{S}^3$:

$$\exp(w) := \begin{cases} \left(\cos(\|w\|), \sin(\|w\|) \frac{w}{\|w\|} \right)^\top & w \neq 0_3 \\ (1, 0, 0, 0)^\top & w = 0_3 \end{cases}$$

- Umformulierung des ursprünglichen Problems

$$\min_{(x, \delta t, w) \in \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3} \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \omega_k^2 r_k^2(x, \delta t, \exp(w))$$

²A. Ude, Nonlinear Least Squares Optimisation of Unit Quaternion Functions for Pose Estimation from Corresponding Features, *14th International Conference on Pattern Recognition*, pp. 425–427, 1998



Gewichtsschemata der Beobachtungen

- 1 Alle Beobachtungen werden gleich gewichtet
- 2 Nach Elevationswinkel θ des jeweiligen Satelliten

$$\frac{1}{\omega_k^2} = \frac{1}{\sin^2 \theta_j}$$

- 3 Nach Träger-Rausch-Verhältnis (C/N0) des Signals

$$\frac{1}{\omega_k^2} = a + b \cdot 10^{-\frac{CN_0 - c}{10}}$$

$$a = 0.60006, b = 50.63920, c = 33.83850$$



Inhaltsverzeichnis

- 1 DLR
- 2 Einführung in die Positionierung mittels Satelliten
- 3 Positionierung in Multi-Antennen-Systemen
- 4 Numerik & Ergebnisse**
- 5 Themen für Masterarbeiten



Nichtlineares Ausgleichsproblem

- Kleinste Quadrate mit nichtlinearem f_k

$$\min_{x \in \mathbb{R}^{n_x}} \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n f_k^2(x)$$

- Notwendige Bedingung für Optimum:

$$\begin{aligned} 0 &= \sum_{k=1}^n f_k(x) \frac{\partial}{\partial x} f_k(x) \\ &= (D_x f(x))^{\top} f(x) \end{aligned}$$



Nichtlineares Ausgleichsproblem

- Linearisiere f mittels Taylor-Entwicklung um $x^{(i)}$

$$f(x) \doteq f(x^{(i)}) + D_x f(x^{(i)}) (x - x^{(i)})$$

- Iteratives Verfahren (Normalengleichung)

$$\begin{aligned} \left(D_x f(x^{(i)}) \right)^\top D_x f(x^{(i)}) \Delta x^{(i)} &= - \left(D_x f(x^{(i)}) \right)^\top f(x^{(i)}) \\ x^{(i+1)} &= x^{(i)} + \lambda^{(i)} \Delta x^{(i)}, \lambda^{(i)} \in (0, 1] \end{aligned}$$

- Alternativ: QR-Transformation

$$\min_{\Delta x^{(i)}} \left\| D_x f(x^{(i)}) \Delta x^{(i)} + f(x^{(i)}) \right\|$$



Nichtlineares Ausgleichsproblem

- Linearisiere f mittels Taylor-Entwicklung um $x^{(i)}$

$$f(x) \doteq f(x^{(i)}) + D_x f(x^{(i)}) (x - x^{(i)})$$

- Iteratives Verfahren (Normalengleichung)

$$\begin{aligned} \left(D_x f(x^{(i)}) \right)^\top D_x f(x^{(i)}) \Delta x^{(i)} &= - \left(D_x f(x^{(i)}) \right)^\top f(x^{(i)}) \\ x^{(i+1)} &= x^{(i)} + \lambda^{(i)} \Delta x^{(i)}, \lambda^{(i)} \in (0, 1] \end{aligned}$$

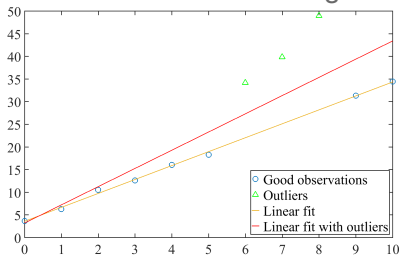
- Alternativ: QR-Transformation

$$\min_{\Delta x^{(i)}} \left\| D_x f(x^{(i)}) \Delta x^{(i)} + f(x^{(i)}) \right\|$$



Robuste Methoden

- Kleinste Quadrate anfällig



- Iterative Änderung der Gewichte, um andere Zielfunktion zu approximieren

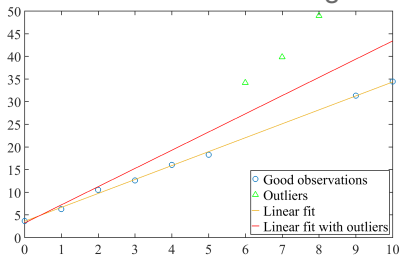
- S-Schätzer

- Minimiert Variation der Residuen
- Keine Voraussetzungen an Beobachtungen
- Jacobi-Matrix der Residuen ungenutzt
- Geeignet bei mehreren Ausreißern



Robuste Methoden

- Kleinste Quadrate anfällig



- Iterative Änderung der Gewichte, um andere Zielfunktion zu approximieren

- **S-Schätzer**

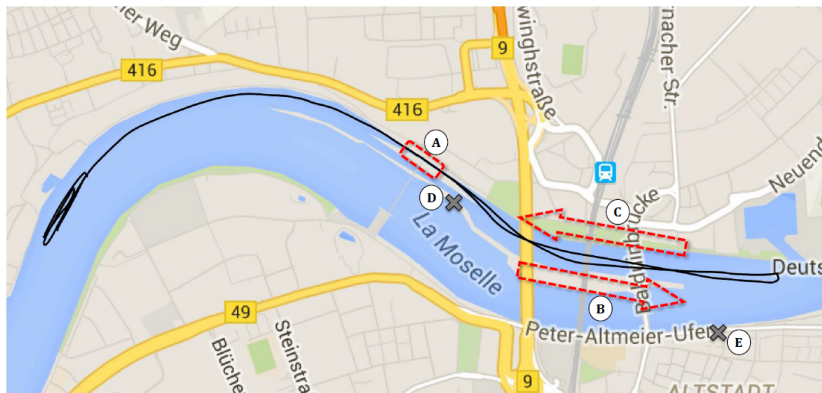
- Minimiert Variation der Residuen
- Keine Voraussetzungen an Beobachtungen
- Jacobi-Matrix der Residuen ungenutzt
- Geeignet bei mehreren Ausreißern



Messkampagne – MS Bingen



Messkampagne – Koblenz an der Mosel



- A – Schleuse; B,C – 3 Brücken
- D,E – Geodätische Totalstationen (Horizontale Referenz)



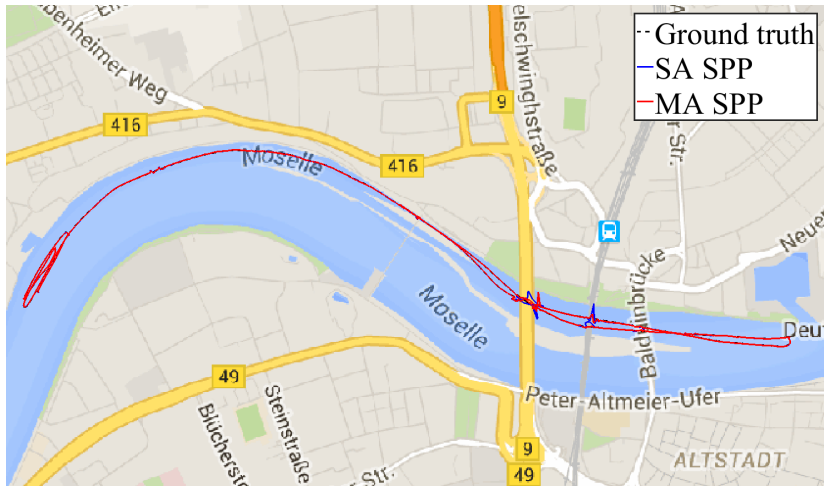
Resultate ohne S-Schätzer

Ansatz	Gewichtsschemata	HPE in [m]		
		Max	\emptyset	RMS
Einfach	Gleich	50.70	2.89	4.53
Multi	Gleich	47.61	2.75	4.17
Einfach	Elevation	91.79	1.70	4.15
Multi	Elevation	45.49	1.73	3.32
Einfach	Signalstärke	49.32	1.47	2.84
Multi	Signalstärke	43.35	1.32	2.31

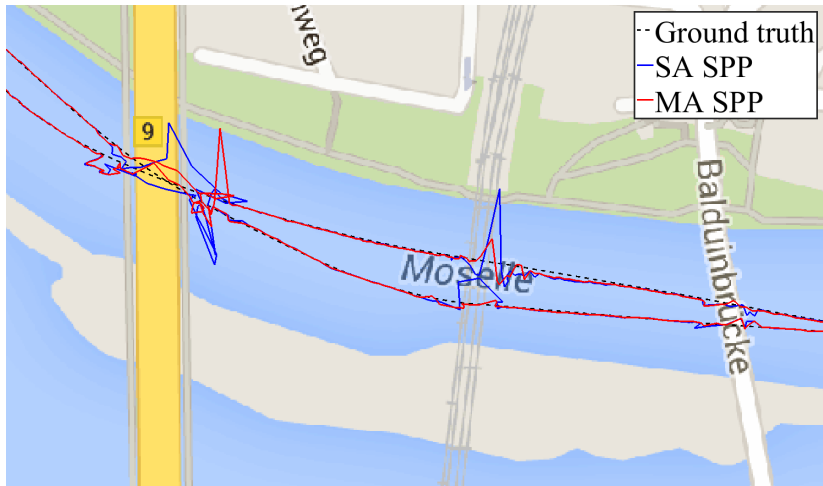
- HPE - Horizontaler Positionsfehler
- RMS - Quadratisches Mittel $\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$



Horizontale Position (Signalstärke)



Horizontale Position (Signalstärke)



Ergebnisse mit S-Schätzer

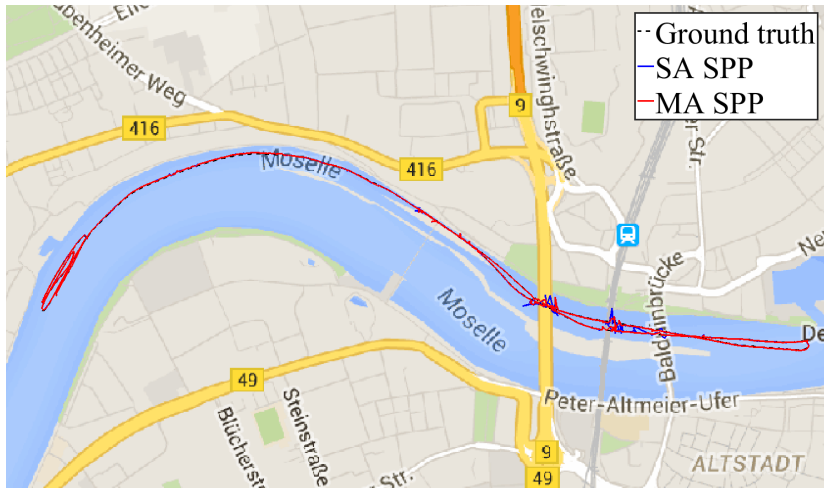
- Nur gleiche Gewichtung betrachtet

Ansatz	Robuste Methode	HPE in [m]		
		Max	\emptyset	RMS
Einfach	—	50.70	2.89	4.53
Einfach	S-Schätzer	47.74	2.44	3.54
Multi	—	47.61	2.75	4.17
Multi	S-Schätzer	37.32	2.18	2.98

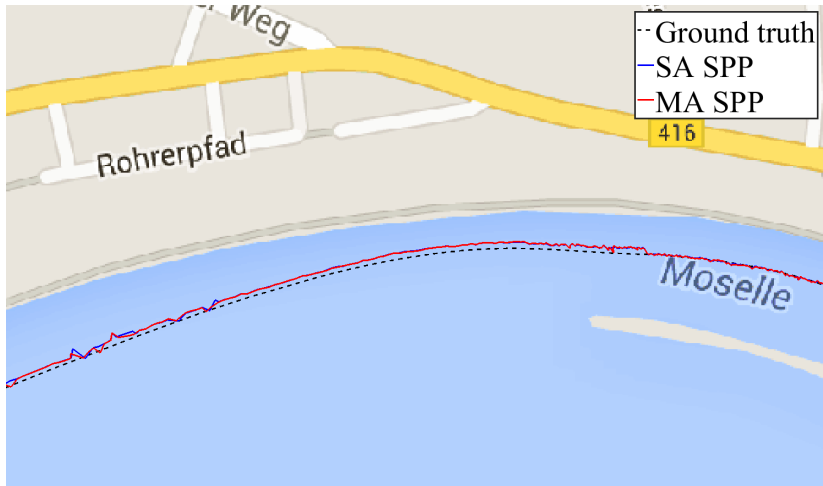
- Verbesserung durch S-Schätzer
- Gewichtung nach Signalstärke besser



Horizontale Position (Gleich gewichtet)

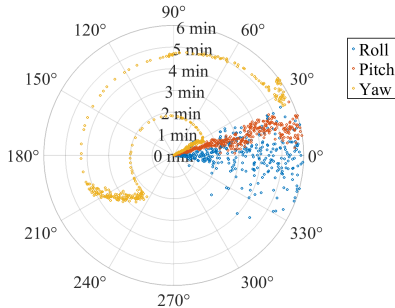


Horizontale Position (Gleich gewichtet)



Orientierung in Euler-Winkel

Euler angles during first six minutes

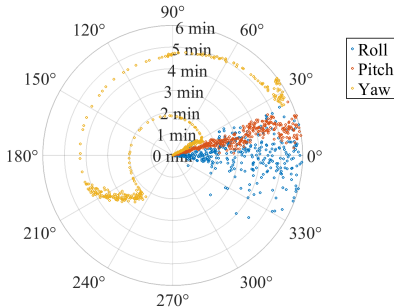


- Yaw zuverlässig
- Roll mit hoher Variation

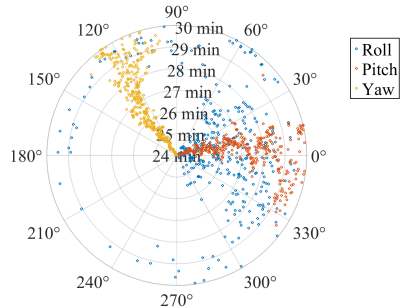


Orientierung in Euler-Winkel

Euler angles during first six minutes



Euler angles during passing of waterway lock



- Yaw zuverlässig
- Roll mit hoher Variation

- Größere Variation bei Yaw und Pitch
- Roll nicht bestimmbar



Ausblick

- Tiefergehende Analyse der Messdaten
 - ▶ Einsetzen der Referenzlösung in Residuen
 - ▶ Verhältnis gute/schlechte Beobachtungen
 - ▶ Ignorieren schlechter Epochen
- Anwenden auf „einfacheren“ Datensatz
 - ▶ Größerer Abstand der Antennen
 - ▶ Verifikation der Orientierung
 - ▶ Bestmögliche Positionsgenauigkeit?
- Analyse des Ansatzes
 - ▶ Mindestanzahl an Beobachtungen pro Antenne?
 - ▶ Satellitengeometrie aus Jacobi-Matrix bestimmbar?



Inhaltsverzeichnis

- 1 DLR
- 2 Einführung in die Positionierung mittels Satelliten
- 3 Positionierung in Multi-Antennen-Systemen
- 4 Numerik & Ergebnisse
- 5 Themen für Masterarbeiten**



Multisensorik



Sensorfusion

Aufgaben

- Analyse einzelner Sensoren für die Positions-, Geschwindigkeits- und Orientierungsbestimmung
- Unterstützung in der Entwicklung von Sensorfusions-Algorithmen
- Entwicklung von Methoden zur Genauigkeitsanalyse von Verfahren zur Positionsbestimmung

Qualifikationen

- Vorkenntnisse oder Interesse an Sensorfusion
- Interesse an maritimer Verkehrstechnik
- Programmierkenntnisse in C/C++ und Matlab



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

